



GUASTI NEGLI AVVOLGIMENTI DI STATORE IN ALTA TENSIONE (2° parte)

Lucia FROSINI

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione
Università di Pavia
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

Indice

- ☀ Caratteristiche degli isolanti;
- ☀ Rigidità dielettrica;
- ☀ Scariche parziali;
- ☀ Effetto corona;
- ☀ Modello dell'isolamento;
- ☀ Misura del fattore di potenza o del tan-delta;
- ☀ Power factor tip-up;
- ☀ AC Hipot test;
- ☀ DC Hipot test.

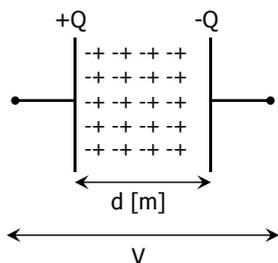
2

L. Frosini

Caratteristiche degli isolanti

I materiali dielettrici, sottoposti all'azione di un campo elettrico, si **polarizzano** con un'intensità che risulta direttamente proporzionale al valore del campo elettrico stesso.

Per **polarizzazione** si intende la deformazione elettrica delle singole molecole del materiale, ossia lo spostamento delle cariche elettriche all'interno delle singole molecole nella direzione del campo.



Questi spostamenti di cariche elettriche sono paragonabili agli spostamenti delle particelle di un mezzo elastico sotto l'azione di forze deformanti.

3

L. Frosini

Caratteristiche degli isolanti

A parità di campo elettrico a cui è sottoposto, ogni materiale isolante si polarizza con un certo grado e una certa modalità strettamente dipendenti dalla sua struttura molecolare. Maggiore è il grado di polarizzazione del materiale, più alto risulta il valore della sua **permittività elettrica (o costante dielettrica) ϵ** , che può essere espressa come prodotto tra la permittività del vuoto ϵ_0 e la permittività relativa del materiale ϵ_r :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \text{ [F/m]} \quad \epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

Se l'isolamento è omogeneo, la permittività è uno scalare di valore costante, indipendente dal valore del campo elettrico che sollecita il materiale, dalla temperatura e dalla frequenza.

La permittività relativa indica la predisposizione di un materiale a trasmettere (o permettere) un campo elettrico: un buon dielettrico, usato come isolante, deve avere bassa permittività.

4

Caratteristiche degli isolanti

Le forze elettriche di polarizzazione sono equilibrate dalle forze di reazione interna molecolare che collegano le cariche elettriche delle singole molecole, allo stesso modo in cui le forze di deformazione di un mezzo elastico sono equilibrate dalle forze di reazione elastica del mezzo.

Se le forze elettriche di polarizzazione raggiungono valori tali da non essere più equilibrate dalle forze di reazione interna molecolare, si ha il fenomeno della **scarica disruptiva** con perforazione del dielettrico, analogo al fenomeno di rottura di un mezzo elastico sollecitato da forze deformanti superiori a quelle di reazione elastica del mezzo.

Quindi, arrivati ad un certo valore del campo elettrico, il materiale dielettrico perde le sue caratteristiche isolanti, così come un corpo elastico si rompe se sottoposto a una sollecitazione meccanica eccessiva.

5

Caratteristiche degli isolanti

Infatti, ad un aumento dell'intensità del campo elettrico corrisponde un aumento delle forze elettriche di polarizzazione che sollecitano gli elettroni periferici dell'atomo.

Quando le forze di reazione interna molecolare, che tengono legati gli elettroni periferici al loro nucleo, non riescono più ad equilibrare quelle dovute al campo elettrico esterno, gli elettroni sfuggono all'azione del loro nucleo diventando liberi e determinando quindi nella massa del materiale una corrente elettrica.

Questa corrente, producendosi pressoché istantaneamente, viene denominata **scarica elettrica**. Essa è tale da creare effetti termici e luminosi notevoli e da portare alla temporanea o permanente perdita delle caratteristiche isolanti del materiale, a seconda del tipo di materiale e della vastità e durata di questo fenomeno.

6

Rigidità dielettrica

Il valore dell'intensità del campo elettrico corrispondente alla tensione di scarica è denominato **rigidità dielettrica** e si esprime in V/m oppure, in unità pratiche, in kV/mm.

La rigidità dielettrica di un materiale è funzione di diversi fattori tra cui:

- l'omogeneità e la purezza del materiale,
- l'umidità e la temperatura,
- il tipo di sollecitazione (andamento e durata del campo elettrico).

Quindi la rigidità dielettrica non è una vera e propria costante del materiale, ma un parametro indicativo circa le possibilità che il materiale ha di resistere ai campi elettrici.

7

Rigidità dielettrica

In particolare, la rigidità dielettrica diminuisce notevolmente col crescere della temperatura e della durata della tensione applicata.

La rigidità dielettrica degli oli minerali diminuisce notevolmente anche con piccole tracce di umidità.

I valori di rigidità dielettrica dei gas più comuni sono simili a quello dell'aria e crescono proporzionalmente ai valori di densità.

In pratica, l'isolamento delle macchine e degli impianti si proporziona i modo che la massima differenza di potenziale a cui è sottoposto l'isolante nelle normali condizioni di impiego risulti minore della metà della rigidità dielettrica dell'isolante e tanto più bassa quanto maggiore è il grado di sicurezza che si desidera.

8

Materiali isolanti

I parametri che caratterizzano i materiali isolanti sono quindi:

- Permittività relativa ϵ_r
- Rigidità dielettrica E_r

Sostanza	Permittività relativa (ϵ_r)	Rigidità dielettrica (E_r) (kV/mm)
Aria (pressione 1 bar)	1,0006	3
Metano (pressione 1 bar)	1,0009	—
Vapor d'acqua (117°C)	1,006	—
Olio minerale	2,2	20
Paraffina	2,2	30
Polietilene	2,3	40
Polistirolo	2,3	40
Carta	2,3	8
Cloruro di polivinile	4	50
Bachelite	5	10
Vetro	6	20
Porcellana	6	30
Mica (muscovite)	7	100
Alcool etilico	25	—
Alcool metilico	31	—
Acqua (purissima)	80	10
Ossido di titanio	90 + 170	5
Titanati di Ba-Sr	1000 + 10 000	5

9

Rigidità dielettrica e scariche parziali

Alcuni valori indicativi della rigidità dielettrica dei materiali usati più frequentemente come isolanti sono i seguenti:

- Aria 3 kV/mm
- Olio minerale 20 kV/mm
- Porcellana 30 kV/mm
- Polietilene 40 kV/mm
- Mica 100 kV/mm

Essendo la rigidità dielettrica dell'aria inferiore a quella di qualunque isolante non gassoso, è chiaro che in presenza di vuoli all'interno dell'isolante (tra conduttore ad alta tensione e ferro a potenziale di terra) possono verificarsi **scariche parziali**, che interessano cioè solo una parte dello spessore dell'isolamento e non provocano la scarica totale, ma possono accelerare il deterioramento del materiale isolante.

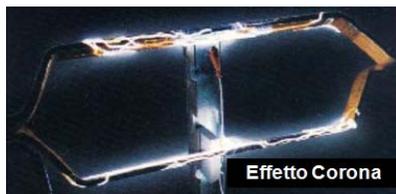
10

Effetto corona

Un caso particolare di scarica è dato dall'**effetto corona**: questo fenomeno si presenta quando l'aria che circonda un conduttore perde, in vicinanza della sua superficie, le caratteristiche isolanti.

Ciò avviene quando l'intensità del campo elettrico supera il valore della rigidità dielettrica dell'aria.

Il fenomeno prende il nome di corona perché attorno al conduttore è talvolta visibile una corona luminosa dovuta alla ionizzazione dell'aria.



11

Scarica parziale

Secondo la norma CEI 42-3 (CEI EN 60270):

“Una scarica parziale è una scarica elettrica che interessa solo una parte del dielettrico esistente fra due conduttori.

Queste scariche possono presentarsi in zone sia adiacenti sia non adiacenti ad un conduttore.

Le scariche parziali in gas intorno ad un conduttore sono talvolta denominate effetto corona. Questo termine non deve essere impiegato per altre forme di scariche parziali.”

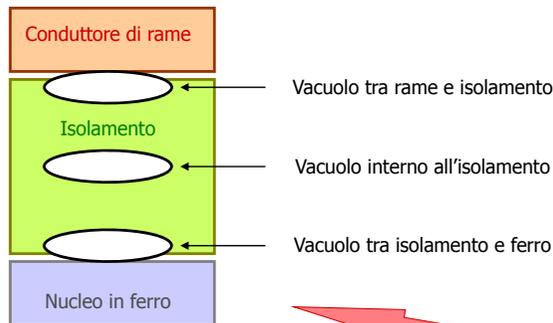
Una scarica parziale può prodursi nei vuoli di un isolamento solido, in bolle gassose nei liquidi isolanti o fra strati dielettrici di caratteristiche diverse.

Essa può anche verificarsi su punte o spigoli acuti di superfici metalliche.

12

Scariche parziali interne

Ricordando come è fatto l'isolamento verso massa di un avvolgimento di statore, possiamo identificare tre possibili zone in cui possono formarsi i vacuoli tra conduttori di rame e nucleo in ferro:



13

Modello dell'isolamento

Vediamo come modellizzare un sistema di isolamento.

Se l'isolamento di un cavo o di una bobina (nel caso si consideri l'avvolgimento di statore di una macchina elettrica rotante) è privo di difetti, idealmente si comporta come un condensatore.

In un condensatore la tensione e la corrente sono sfasate tra loro di un angolo $\theta = 90^\circ$ e la corrente è totalmente capacitiva.

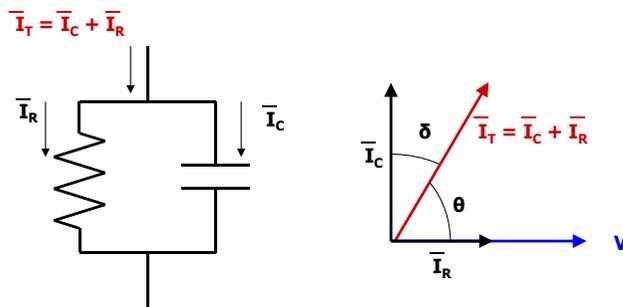
Se ci sono delle impurità o dei vacuoli nell'isolamento, la resistenza non è più infinita e si ha una componente di corrente resistiva attraverso l'isolamento.

Di conseguenza la tensione e la corrente saranno sfasate tra loro di un angolo θ inferiore a 90° .

L'angolo θ tra tensione e corrente è pertanto indicativo della contaminazione dell'isolamento e quindi della sua qualità e affidabilità.

14

Modello dell'isolamento



Idealmente dovrebbero essere:
 $\theta = 90^\circ \rightarrow \cos\theta = 0$
 $\delta = 0^\circ \rightarrow \tan\delta = 0$

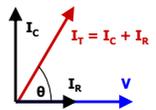
Come misura della qualità dell'isolamento si possono utilizzare:

- **$\cos\theta$ (fattore di potenza dell'isolamento, "power factor", PF);**
- **$\tan\delta$ (angolo di perdita, fattore di dissipazione).**

Per piccoli valori di δ , le misure di $\tan\delta$ e $\cos\theta$ forniscono risultati simili.

15

Misura del fattore di potenza dell'isolamento



La misura del fattore di potenza dell'isolamento di una macchina elettrica rotante è una prova non distruttiva in tensione alternata (AC) che si può eseguire solo fuori linea.

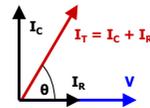
È un metodo indiretto per determinare se sono presenti scariche parziali (PD) nell'isolamento e, più in generale, per determinare la qualità dell'isolamento.

Poiché le PD sono sintomo di molti meccanismi di deterioramento dell'isolamento degli avvolgimenti in alta tensione, questa prova può fornire informazioni riguardo guasti potenziali degli avvolgimenti.

Questa prova è utilizzata, oltre che durante la manutenzione fuori linea, anche dai costruttori come test di controllo qualità per assicurare una appropriata impregnazione di resina epossidica e poliestere.

16

Misura del fattore di potenza dell'isolamento



La misura del fattore di potenza è eseguita applicando tensioni incrementali, partendo da una tensione inferiore a quella che può provocare le scariche parziali e continuando fino al valore nominale della tensione ("rated line-to-ground voltage") della macchina.

L'avvolgimento di statore deve essere isolato e il neutro separato in modo che ogni fase possa essere provata individualmente.

Ogni fase viene provata verso terra e quindi rispetto alla fase adiacente.

La misura del fattore di potenza è utilizzata anche per provare le condizioni dell'isolamento dei cavi in generale.

17

Fattore di potenza a tensione ridotta

Il fattore di potenza misurato a tensione ridotta (**20-25% della tensione nominale**) è un indicatore delle perdite intrinseche del dielettrico e delle sue condizioni generali.

Un valore accettabile di fattore di potenza a tensione ridotta assicura che il sistema di isolamento è stato costruito con materiali a basse perdite, impregnato correttamente e non è contaminato: fornisce quindi informazioni anche riguardo il contenuto di umidità, il grado generale di pulizia e la corretta manutenzione dell'isolamento.

Un elevato valore del fattore di potenza a tensione ridotta può essere anche causato da un cattivo contatto del rivestimento semi-conduttivo delle bobine con il nucleo di statore.

18

Fattore di potenza a tensione nominale

Per bassi valori di tensione (generalmente inferiori al 50% della tensione nominale), il $\cos\theta$ rimane pressoché costante al variare della tensione.

Per valori di tensione più elevati, se sono presenti vacuoli nell'isolamento, potranno verificarsi alcune scariche parziali.

Queste scariche producono calore, luce, rumore e quindi consumano energia.

Di conseguenza, in una bobina con isolamento delaminato (ad es. dovuto a surriscaldamento per lungo periodo), all'aumentare della tensione applicata si verificheranno scariche parziali e quindi il fattore di potenza aumenterà oltre il livello accettabile, a causa delle perdite nel dielettrico, poiché la scarica parziale costituisce una componente addizionale di perdita nell'isolamento.

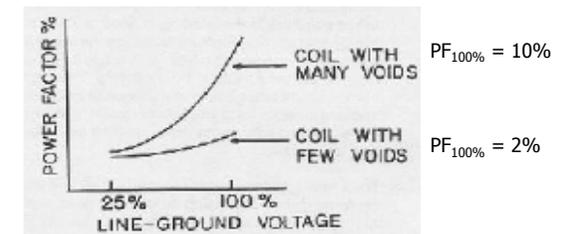
Maggiore è l'energia consumata dalle scariche parziali, maggiore è l'aumento del fattore di potenza dell'isolamento.

19

Power factor tip-up

Il "power factor tip-up" è definito come la differenza tra il fattore di potenza misurato al 100% della tensione nominale e quello misurato al 25% della tensione nominale:

$$\text{tip-up} = \text{PF}_{100\%} - \text{PF}_{25\%}$$



Più alto è il tip-up, maggiore è l'energia consumata dalle scariche parziali.

Misurando il fattore di potenza per diversi valori di tensione, è possibile individuare il valore di tensione a cui iniziano a prodursi le scariche parziali.

20

Power factor tip-up

Spesso il fattore di potenza e il tip-up sono espressi in percentuale.

Il "power factor tip-up" è sensibile alla quantità di vacuoli contenuti nel sistema di isolamento.

Come valori indicativi, un isolamento di una bobina con pochi vacuoli può avere PF = 2% a tensione nominale, mentre un isolamento con molti vacuoli può avere PF = 5÷10% a tensione nominale.

Un numero elevato di vacuoli può essere dovuto a una scarsa qualità della costruzione del sistema di isolamento e del processo di impregnazione, all'invecchiamento della nastratura o del materiale legante del sistema di isolamento, a un difettoso o deteriorato rivestimento semiconduttivo.

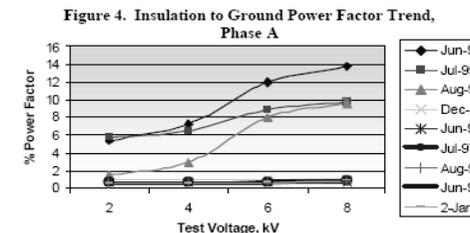
A sua volta, la presenza di un numero elevato di vacuoli provoca scariche parziali, che a loro volta danneggiano i materiali leganti.

21

Esempi di misura del fattore di potenza

Nella figura seguente sono riportati i risultati delle misure effettuate su un isolamento impregnato in resina epossidica di un turbo-generatore da 15,4 MVA a 13,8 kV che è stato riavvolto dopo aver verificato valori troppo elevati sia del fattore di potenza a tensione ridotta, sia del tip-up, dovuti alla presenza di scariche parziali.

Note: Machine re-wound November, 1995

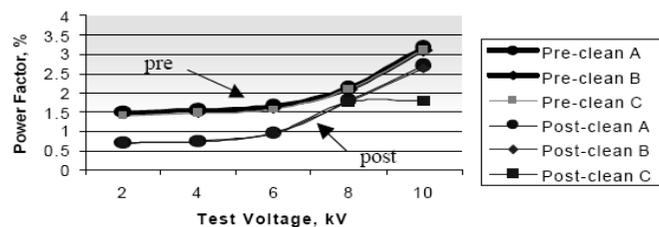


22

Esempi di misura del fattore di potenza

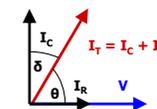
Nella figura seguente si possono osservare gli effetti di una corretta manutenzione (pulizia) sulle tre fasi di un isolamento impregnato in resina epossidica di un turbo-generatore da 46,5 MW a 13,8 kV che presentava valori elevati del fattore di potenza a 2 kV, dovuti a contaminazione dell'isolamento.

Figure 6. Insulation to Ground Power Factor Before And After Cleaning



23

Fattore di potenza e tan-delta



Per la misura del fattore di potenza o del tan-delta si possono utilizzare anche strumenti a frequenza molto bassa ("Very low frequency", VLF): in questo modo si riducono la corrente e la potenza necessarie per provare un carico altamente capacitivo.

Supponiamo di voler provare a 20 kV l'isolamento di un cavo o di un avvolgimento avente una capacità di 1 µF.

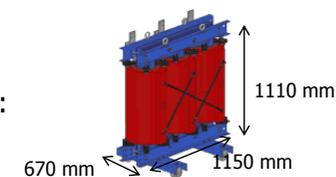
La sua reattanza a 50 Hz è:

$$X_C = 1/2\pi fC = 1/(2\pi \cdot 50 \cdot 0,000001) = 3185 \Omega$$

Di conseguenza, saranno necessarie una corrente e una potenza pari a:

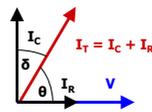
$$I_C = V/X_C = 6,3 \text{ A} \quad P = VI = 125600 \text{ VA}$$

Quindi sarà necessario un trasformatore da 160 kVA:



24

Fattore di potenza e tan-delta



Per provare lo stesso cavo a una frequenza di 0,1 Hz si ha:

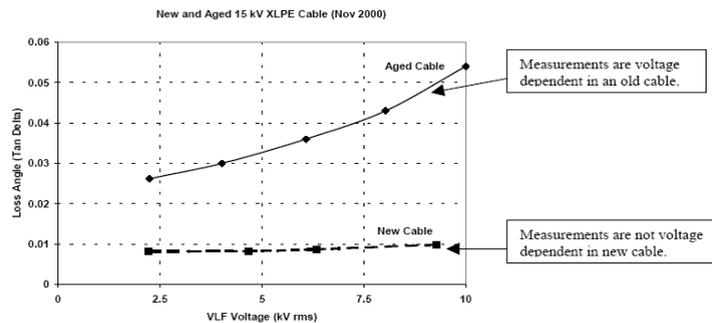
$$X_C = 1/2\pi fC = 1/(2\pi \cdot 0,1 \cdot 0,000001) = 1,6 \text{ M}\Omega$$

$$I_C = V/X_C = 13 \text{ mA}$$

$$P = VI = 250 \text{ VA}$$

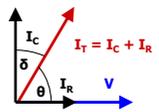
Quindi sarà necessaria una potenza 500 volte inferiore.

Inoltre, l'ampiezza del tan-delta aumenta al diminuire della frequenza, rendendo più semplici le misure: $\tan\delta = I_R/I_C = 1/2\pi fCR$



25

Fattore di potenza e tan-delta



La misura del fattore di potenza o del tan-delta può quindi essere utilizzata come strumento di manutenzione se eseguita regolarmente a intervalli periodici (es. una volta all'anno).

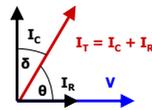
La prima misura è infatti poco significativa, perché complicata dalla presenza di carburo di silicio (SiC) nel rivestimento semi-conduttivo: la sua resistenza diminuisce all'aumentare della differenza di potenziale a cui è sottoposto.

Quindi il SiC presenta elevata resistenza a bassa tensione, ma resistenza relativamente bassa a tensione nominale, per cui è possibile misurare un tip-up del 2-3% anche in isolamenti privi di difetti.

Misurando periodicamente il tip-up, se questo aumenta rispetto al livello iniziale, è probabile che l'avvolgimento presenti una significativa attività di scariche parziali.

26

Fattore di potenza e tan-delta



Il fattore di potenza o il tan-delta forniscono una valutazione della qualità dell'isolamento provato, ma non sono in grado di localizzare eventuali difetti né di stabilire se l'entità dei difetti è più o meno elevata.

Questo tipo di misura è relativamente semplice da eseguire e meno costosa rispetto alla misura delle scariche parziali: il costo dello strumento è nell'ordine dei 35000 € e non è necessario personale esperto per l'interpretazione delle misure.

Lo stesso tipo di strumento può essere utilizzato per l'AC Hipot test.



VLF-4022CM
0-40 kV @ 5.5 uF

27

AC Hipot test

Per "Hipot test" si intende l'applicazione una elevata tensione ("High Potential") ad un avvolgimento o ad un cavo.

La prova, da eseguirsi fuori linea, è finalizzata a trovare grossi difetti nell'avvolgimento applicando una tensione più alta di quella a cui l'avvolgimento è normalmente sottoposto quando è in servizio.

L'idea è che se l'avvolgimento supera la prova ad alta tensione, una volta ritornato in servizio, probabilmente non si guasterà a breve termine a causa dell'invecchiamento dell'isolante.

Se l'avvolgimento fallisce la prova ad alta tensione, è necessario ripararlo o riavvolgerlo, poiché l'isolamento contro massa è stato perforato.

Questa prova è utilizzata sempre come collaudo prima della messa in servizio di avvolgimenti nuovi o riavvolti, talvolta anche come prova in fase di manutenzione.

28

AC Hipot test in manutenzione

Il problema di utilizzare l'AC Hipot test come prova durante le revisioni periodiche in fase di manutenzione è che l'avvolgimento può guastarsi e quindi occorre sostituire o l'isolamento perforato, o la bobina con l'isolamento perforato, o l'intero avvolgimento.

Tutte queste alternative sono molto costose e comportano un ritardo nel rimettere la macchina in servizio.

Poiché l'AC Hipot test può essere distruttivo e ritardare il ritorno in servizio della macchina, molte aziende decidono di non utilizzarlo durante la manutenzione.

La giustificazione è che l'AC Hipot test può causare un guasto che potrebbe non accadere per un lungo periodo di funzionamento della macchina, avendo come conseguenza un riavvolgimento o una riparazione significativa prima che questi siano realmente necessari.

29

AC Hipot test in manutenzione

Tuttavia, per alcune macchine critiche un guasto in servizio può provocare un danno maggiore alla produzione rispetto a quello provocato da un guasto durante un AC Hipot test in manutenzione.

Per esempio, un guasto in servizio di un motore critico in una raffineria di petrolio può fermare la produzione per giorni o settimane, con un costo di almeno un milione di euro al giorno.

Inoltre, un guasto in servizio può provocare ulteriori danni alla macchina, come ad esempio un danno al nucleo di statore, con conseguenti costi di riparazione molto più elevati rispetto a quelli del solo avvolgimento.

Quindi, la decisione di impiegare l'AC Hipot test in manutenzione dipende da quanto critica è la macchina per l'impianto, dalla disponibilità di parti di ricambio, e dalla filosofia dei gestori dell'impianto per evitare fermate inaspettate dell'impianto.

30

AC Hipot test

Durante il collaudo, l'ampiezza della tensione da applicare è:

$$2 * E + 1 \text{ kV}$$

dove E è il valore efficace della tensione nominale fase-fase di statore.

In manutenzione, l'ampiezza della tensione da applicare è:

$$1,25 \div 1,5 * E$$

Alcuni sostengono che questa prova invecchia l'isolamento, perché l'applicazione di una tensione elevata può provocare scariche parziali, le quali tendono a degradare le componenti organiche dell'isolamento contro massa, riducendone la sua vita. Tuttavia, i calcoli indicano che il deterioramento dell'isolamento dovuto a un minuto di applicazione di una tensione pari a $1,5 * E$ equivale a circa 10 giorni di tensione nominale applicata durante il normale servizio. Quindi, la vita di un avvolgimento che è costruito per durare 30 anni non è significativamente ridotta.

31

DC Hipot test

Un altro tipo di Hipot test è effettuato in tensione continua (DC).

Si tratta sempre di una prova passa-non passa.

La differenza è che in DC la caduta di tensione attraverso i componenti dell'isolamento dipende dalla loro resistività.

Al contrario, in AC la caduta di tensione attraverso ciascun componente dipende dalla sua capacità (ossia dalla sua permittività relativa).

Quindi, la distribuzione di tensione attraverso l'isolamento può essere completamente diversa durante la prova in DC rispetto a quella in AC.

Nei sistemi di isolamento più vecchi, in mica-asfalto, questa differenza è meno pronunciata a causa del valore finito della resistenza dovuto all'assorbimento di umidità.

32

DC Hipot test

Nei sistemi di isolamento più nuovi, in mica-resina epossidica, la resistenza è praticamente infinita, perciò è possibile che difetti anche significativi dell'isolamento non provochino la perforazione del dielettrico con il DC Hipot test, mentre potrebbero essere individuati con l'AC Hipot test, a causa della maggior uniformità della distribuzione di tensione attraverso l'isolamento.

Per gli avvolgimenti moderni, l'AC Hipot test produce una distribuzione di sforzi elettrici attraverso l'isolamento uguale a quella che si ha durante le normali operazioni della macchina in servizio.

Di conseguenza, per i moderni avvolgimenti risulta più efficace l'AC Hipot test rispetto al DC.

L'AC Hipot test richiede però apparecchiature più costose rispetto al DC.

DC Hipot test

Il DC Hipot test deve essere effettuato a una tensione 1,7 volte maggiore della tensione utilizzata per l'AC Hipot test.

Se utilizzato in manutenzione, il DC Hipot test deve essere effettuato a una tensione pari a $\frac{3}{4}$ di quella applicata in fase di collaudo.

Quindi, per un avvolgimento di statore a tensione nominale 13,8 kV si ha:

- tensione di prova in accettazione: $1,7 \cdot (2 \cdot 13,8 + 1) = 48,6$ kV;
- tensione di prova in manutenzione: $0,75 \cdot 48,6 = 36,5$ kV

Il DC Hipot test non provoca invecchiamento dell'isolamento poiché è raro che si verifichino scariche parziali in tensione continua.

Fanno eccezione i cavi che possono essere stati contaminati dall'acqua, come ad es. gli avvolgimenti di statore con raffreddamento diretto ad acqua e i cavi interrati.

DC Hipot test convenzionale

Nel DC Hipot test convenzionale, un appropriato alimentatore di potenza in DC è connesso all'avvolgimento, o attraverso l'interruttore di macchina o attraverso i suoi terminali.

La tensione viene elevata velocemente al valore desiderato e mantenuta per 1 o 5 minuti.

Successivamente, la tensione viene velocemente abbassata e l'avvolgimento viene collegato a terra.

Se l'interruttore si apre, molto probabilmente è avvenuta una perforazione dell'isolamento, con conseguente caduta a zero della resistenza dell'isolamento e passaggio di corrente "infinita".

Poiché l'alimentazione non può fornire una corrente infinita, l'interruttore si apre e questa è un'indicazione che l'avvolgimento ha fallito la prova ed è necessaria una riparazione o sostituzione dello stesso.

DC Hipot test convenzionale

Il DC Hipot test convenzionale non fornisce molte informazioni diagnostiche, sebbene sia possibile misurare la corrente in DC dopo 1 o 5 minuti di applicazione della tensione di prova.

Se si tiene sotto controllo questo valore della corrente negli anni, una tendenza in aumento indica che si sta verificando una contaminazione dell'isolamento.

Step-stress DC Hipot test

Un altro tipo di DC Hipot test consiste nell'aumentare la tensione a gradini, per esempio di 1 kV ciascuno, tenendo ciascun livello di tensione per un minuto, misurando la corrente in DC alla fine di ciascun gradino (quando la corrente capacitiva è andata a zero) e facendo il grafico della corrente rispetto alla tensione.

Idealmente il grafico dovrebbe essere una curva leggermente crescente.

Tuttavia, talvolta la corrente cresce brutalmente oltre un certo valore di tensione. Questo può essere sintomo del fatto che l'isolamento è vicino alla perforazione. Se il collaudatore agisce rapidamente, la prova può essere terminata prima che accada una perforazione completa dell'isolamento.

Comunque, se la tensione alla quale viene individuata la salita di corrente è inferiore alla tensione nominale, c'è un elevato rischio di riportare in servizio l'avvolgimento senza opportune riparazioni.

37

DC Ramp Hipot test

Una terza possibilità per effettuare il DC Hipot test consiste nell'aumentare dolcemente e linearmente la tensione con un tasso costante, per esempio di 1 o 2 kV al minuto. La corrente rispetto alla tensione viene automaticamente visualizzata su un grafico.

La corrente capacitiva è costante e può essere facilmente ignorata.

Il vantaggio di questo test è che rappresenta il metodo più sensibile per individuare quando accade la salita improvvisa della corrente.

Di conseguenza, questo metodo è quello che rende più semplice evitare la perforazione dell'isolamento.

38

DC Hipot test

Fondamentalmente il DC Hipot test non è un test diagnostico che fornisce un indicatore delle condizioni dell'isolamento.

Piuttosto, è un test passa-non passa, in cui un avvolgimento gravemente deteriorato fallisce.

Tuttavia, la corrente in DC misurata a ogni prova può fornire un'indicazione qualitativa della condizione dell'isolamento, più di quanto facciano le misure della resistenza dell'isolamento (IR) e dell'indice di polarizzazione (PI).

Comunque, occorre prestare attenzione al fatto che la corrente è strettamente dipendente dalla temperatura dell'avvolgimento e dall'umidità atmosferica.

Quindi, in alcuni casi l'analisi dei grafici della corrente rilevati di anno in anno risulta di difficile interpretazione (come già detto per la IR).

39

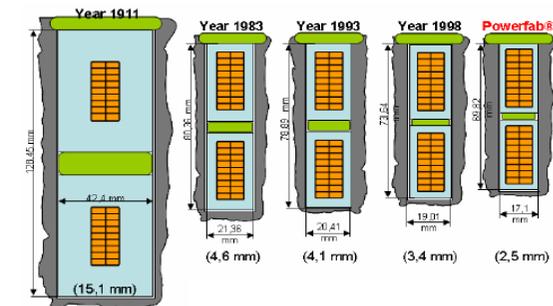


Figure 10: Groundwall insulation reduction over the last centuries (nominal voltage: 15kV)
[Source: Glew C.N.: "The Next Generation" – A Review of the Factors influencing the Output of an Electrical Machine in the New Millenium.", INSUCON/ISOTEC '98, p. 231-242]



Figure 2: VPI and RR mica tape rolls

In questa figura si può osservare come negli anni si siano ridotti gli spessori degli isolamenti verso massa, grazie all'impiego di nuovi materiali e ad una più accurata progettazione con metodi ad elementi finiti.

Nell'altra figura sono riportati due nastri utilizzati per l'isolamento tramite Resin Rich (RR) e VPI.

40